

遥感数据在农业旱情监测中的应用研究进展

姚远^{1,2,3}, 陈曦^{1,4}, 钱静^{1,2*}

1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011
2. 中国科学院深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055
3. 中国科学院大学, 北京 100049
4. 中国科学院中亚生态与环境研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830011

摘要 在全球变暖的背景下, 农业干旱频发不仅严重影响区域粮食安全和生态安全, 同时还威胁社会经济稳定和可持续发展。农业旱情遥感监测是预防农业旱灾发生发展的重要途径, 可以为科学制定旱灾风险管理措施提供有力支撑。因此, 厘清农业旱情遥感监测研究进展对于今后更好地开展农业旱情监测及预警研究以及进一步促进社会经济的可持续发展具有重要的现实意义。基于此, 系统梳理了当前遥感数据在农业旱情监测中的应用研究进展。针对不同的农业旱情评价对象, 将旱情监测指标分为降水监测指标、土壤含水量监测指标和作物需水监测指标, 并对不同指标涉及的遥感数据源和评价方法进行了归纳和总结。重点针对农业旱情监测涉及的最主要的两种典型地物(土壤和植被)的光谱特性差异和对水分变化的敏感波段不同, 系统总结了微波遥感监测法, 可见光、近红外与热红外遥感监测法和高光谱遥感监测法用于农业典型地物旱情监测的现今进展, 并探讨了未来农业旱情遥感监测研究的主要发展方向, 以期今后更好地开展农业旱情预警和调控管理工作提供参考。

关键词 农业旱情; 旱情监测; 遥感数据; 研究进展

中图分类号: TV122 **文献标识码:** R **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)04-1005-08

引言

旱情是指在一定时期内因水量相对亏缺造成某地理区域内的干旱情况, 通常划分为农业干旱、水文干旱、气象干旱和社会经济干旱等四种类型^[1]。在全球变暖的背景下, 特大干旱、极端高温天气事件发生的强度和频率日趋增加, 干旱所造成的灾害(简称旱灾)已成为当前世界上最为严重的自然灾害类型, 严重威胁国家粮食安全、供水安全和生态安全^[2]。近年来, 全球及区域旱灾频发, 特别是在中亚、俄罗斯、澳大利亚和我国发生的严重旱灾事件, 不仅造成大面积粮食减产绝收危及粮食安全, 还严重影响社会稳定和经济可持续发展^[3]。

传统的农业干旱监测方法主要基于以台站气象观测数据和墒情站土壤观测数据为代表的站点数据, 通过能够表达干

旱强度和持续时间传统干旱监测指数, 如作物湿度指数(crop moisture index, CMI)^[4]、帕尔默干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI)^[5]、标准降水指数(standardized precipitation index, SPI)^[6]、地表水分供应指数(surface water supply index, SWSI)^[7]等来划分旱情等级, 开展干旱预警工作。上述指数的优点在于能够同化大气降水、土壤水分和湿度供给等信息, 真实性较高, 缺点在于监测精度易受站点分布密度的影响, 在区域尺度范围内很难反映农业干旱的细节状况, 并且在空间代表性上有一定的局限^[8]。遥感技术的发展有效弥补了传统监测手段的不足, 遥感数据因其具有获取成本低、监测范围广、数据连续性强等优点, 已成为当前开展农业旱情监测研究的主要数据源^[9]。近年来, 国内外专家学者基于遥感数据发展了大量用于农业旱情监测的方法, 但不同遥感监测方法在不同区域尺度上的应用均存在较大的适应性问题, 如何针对某个特定的区域, 选取最佳遥感

收稿日期: 2018-02-11, 修订日期: 2018-06-22

基金项目: 中国科学院 A 类战略性先导科技专项(XDA20060303), 中国科学院“西部之光”人才培养引进计划青年学者 A 类项目(2016-QNXZ-A-5), 国家自然科学基金项目(41761144079), 国家重点研究发展计划项目(2017YFC0404501), 中国科学院国际合作项目(131551KYSB20160002)资助

作者简介: 姚远, 1987年生, 中国科学院新疆生态与地理研究所博士研究生 e-mail: xinjiangyaoyuan@sina.com

* 通讯联系人 e-mail: jingqian@siat.ac.cn

监测数据源和监测方法已成为当前农业旱情研究的热点问题之一^[10]。基于此,本研究重点从评价农业旱情最为主要的大气降水量、土壤含水量和农作物需水量等 3 个方面,系统梳理和归纳了当前国内外农业旱情遥感监测研究的近今进展,重点比对分析了不同数据源及其监测方法的优势和不足,并从传统地面数据和遥感数据相结合的角度出发,探讨了未来研究的发展方向,以期今后更好的开展农业旱情监测和预警研究提供参考。

1 旱情遥感监测方法

农业旱情评价对象主要涉及大气降水和两种典型地物(土壤和农作物植被),评价指标按照评价对象的不同具体分为:(1)降水监测指标—用于评价由于大气蒸发强烈导致降水和蒸发不平衡,从而造成的水分补充不足;(2)土壤含水量监测标—用于评价由于降水不足而导致的土壤缺墒;(3)作物需水监测指标—用于评价由于降水减少和土壤缺墒导致的农作物水分亏缺及其对作物正常生理生长的抑制。本研究从遥感监测的角度出发,对上述 3 种农业旱情评价指标及其评价方法进行归纳总结。

1.1 降水监测指标

降水是最重要也是最难于观测的农业旱情变量因素之一。准确获取农业区降水量的时空分布特征对于农业旱情监测具有重要的现实意义。传统的由气象站点观测获得的降水数据,易受到站点分布不均匀、站点数量稀少等客观因素影响,无法对大面积农作物种植区进行有效的高精度观测。随着遥感卫星降水反演技术的发展和卫星降水产品(satellite rainfall estimation, SRE)的不断丰富,越来越多的国内外学者利用 SRE 在气象站点稀疏、地形复杂的农区开展旱情监测研究^[11-12]。当前,全球主要的 SRE 产品信息见表 1。

表 1 全球主要卫星降水产品

Table 1 Summary of mainly global satellite precipitation products

数据	国家	空间分辨率	时间分辨率	卫星发射时间
TRMM 3B42/3B42RT	美国	0.25°	3 h	1998
CMORPH	美国	0.25°	3 h	2002
GSMaP MWR+	日本	0.25°	1 h	2005
GSMaP MVK+	日本	0.10°	1 h	2005
PERSIANN	美国	0.25°	3 h	2000
GPCP	美国	0.25°	月	1979

在众多卫星降水产品中,TRMM 数据因其精度最为接近气象站点观测的降雨量数据,因而被广泛用于农业旱情监测研究。Rhee 和 Carbone^[13]基于 TRMM 数据,在美国西部地区开展了干旱监测,结果表明 TRMM 数据的应用可以有效解决无站点或站点稀缺地区干旱监测的精度问题。王兆礼等^[14]通过开展基于 TRMM 的高时空分辨率降水数据产品在中国大陆 1998 年—2015 年间的干旱监测效用评估研究,证明了该产品适用于大尺度气象干旱的监测,能够有效揭示中

国大陆干旱的演变规律。此外,水汽含量(又称大气可降水量)作为可以有效预测降雨的物理量,其时空变化信息也是农区旱情监测的一个有效因子^[15]。王永前等^[16]系统总结了目前热红外、微波和可见光-近红外遥感在水汽反演方面的优势和不足,并提出当前应进一步将多源遥感数据相结合,通过改进反演算法以解决时下缺乏高精度高时空分辨率水汽产品的问题。

1.2 土壤含水量监测指标

土壤含水量是指土壤非饱和层的水分含量。土壤水分含量不仅是大气和陆地能量交换过程的关键因子,同时也是农业领域评价农作物生长和农业旱情程度的重要指标。主要包括 3 种监测方法:微波遥感监测法,可见光、近红外与热红外遥感监测法和高光谱遥感监测法。

1.2.1 基于微波遥感的土壤含水量监测

红外和可见光遥感监测土壤水分易受到云层和光照条件的限制,而微波遥感具有全天候、全天时的特点,对云层和地表植被有较强的穿透力,可以不受天气条件的限制,目前已成为长时间序列大区域尺度上土壤水分监测的有效手段。由于土壤含水量和土壤介电常数具有较强的相关性,而微波后向散射系数与土壤介电常数密切相关,因而微波遥应用于土壤水分监测具有良好的物理基础支撑。根据方式的不同,主要分为以下三种方法:主动微波遥感监测、被动微波遥感监测和主被动微波联合监测。其中,主动微波可以通过观测土壤表面的后向散射系数变化反演区域土壤水分。优点在于空间分辨率相对较高,可以探测地表下 5 cm 深度的土壤水分信息,具有全天候、全天时以及测量范围广的特点^[17]。缺点在于时间分辨率低,以及因数据量大带来的处理困难。表 2 按照卫星发射时间由近及远的顺序列举了当前常用的星载合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)数据源。被动微波遥感主要通过星载微波辐射计,包括 AMSR-R, SSMR, FY-3, SSM/I, Windsat 等,从远距离探测下垫面的亮度温度用于反演土壤含水量。与主动微波传感器相比,被动微波遥感传感器对地表土壤含水量变化更加敏感,具有较高的时间分辨率,数据量小且容易处理,适用于大区域尺度的土壤水分反演。但由于空间分辨率较低,因而制约了其在小区域尺度土壤水分监测上的应用^[18]。针对主动和被动微波遥感各自存在的优缺点,国内外专家学者尝试将主被动微波遥感联合应用于土壤水分监测研究。研究表明,主被动微波联合的方法通过优势互补,不仅可以简化土壤水分估算的过程,还有利于提高土壤水分反演的精度^[19]。表 3 列举了目前国内外专家学者基于主动微波、被动微波和主被动微波联合开展土壤水分监测所应用的模型、方法以及各自的适用对象。

1.2.2 基于可见光、近红外与热红外遥感的土壤含水量监测

由于不同湿度的土壤在可见光、近红外波段表现出不同的波谱特性,土壤水分含量越高,红光波段和近红外波段的吸收越强,反射率越低,特别是土壤光谱变化 99% 以上的信息可以通过红光波段、近红外和短波红外波段进行描述,这为利用光学遥感数据开展旱情评估提供了重要的理论支撑。

主要方法包括：基于特征空间的指数监测法和热惯量法。一方面，基于土壤发射率变化，由 Abduwasit 等^[58]提出的基于近红外波段和红光波段的光谱特征空间建立的垂直旱情指数(perpendicular drought index, PDI)，以及在此基础上构建的改进垂直干旱指数(modified Perpendicular drought index, MPDI)^[59]被广泛用于土壤水分时空变化监测。其中，PDI 更

适用于裸土监测，而不适用于植被覆盖度较高的区域。MPDI 则充分考虑了植被覆盖的影响，在不同植被覆盖条件下的监测精度更高。但与微波监测方法相比，PDI 和 MPDI 只能反映表层土壤的水分信息，不能反映更深层次的区域土壤水分变化情况。

表 2 主要应用于土壤水分监测的星载合成孔径雷达数据源

Table 2 Spaceborne synthetic aperture radar data sources used mainly in monitoring soil moisture

卫星	国家	运行时间	频段	空间分辨率/m	时间分辨率/d	极化方式
ALOS-2	日本	2014. 5. 24—	L	1~3; 310 m	14	单极化/双极化/四级化
Sentinel-1	欧洲航天局	2014. 4. 3—	C	5; 5×20; 20×40	12	单极化/双极化
HJ-1C	中国	2012. 11. 19—	S	5; 20	31	VV
RISAT-1	印度	2012. 4. 26—	C	<2; 3; 12; 25; 50	25	单极化/双极化/四级化
TanDEM-X	德国	2010. 6. 21—	X	1; 3; 18	11	单极化/双极化/四级化
RADARSAT-2	加拿大	2007. 12. 14—	C	1; 3; 5; 8; 25; 30; 50; 100	24	单极化/双极化/四级化
COSMO-SkyMed	意大利	2007. 6. 8—	X	1; 3; 5; 15; 30; 100	16	单极化/双极化
ENVISAT	欧洲航天局	2002. 3. 1—2012. 4. 8	C	10; 30; 150; 1 000	35	单极化/双极化

表 3 微波遥感监测土壤水分主要研究方法

Table 3 Main research methods of microwave remote sensing on soil moisture monitoring

主要方法	研究范围	具体内容	算法
主动微波	裸露或者植被稀疏地表	(1)理论模型：①基尔霍夫模型 ^[20] ，包括小扰动模型、改进 SPM 模型、物理光学模型、几何光学模型；②积分方程模型 ^[21] ；③ IEM 改进模型 ^[22] ，包括 AIEM, EAIEM, IEMM, IEM2M；④算子展开方法 ^[23] ；⑤小斜坡近似 ^[24] ；⑥全波方法 ^[25] ；⑦相位扰动理论 ^[26] ；(2)经验模型：①线性模型 ^[27] ；②Dubois 模型 ^[28] ；③ Oh 经验模型 ^[29] ；(3)半经验模型：① Oh 模型 ^[30] ；② Shi 模型 ^[31] ；③ Chen 模型 ^[32] ；(4)数值模型：① NMM3D 模型 ^[33] ；② FDTD 模型 ^[34]	(1)变化检测法 ^[41] ；(2)回归分析法 ^[42] ；(3)神经网络法 ^[43] ；(4)优化方法 ^[44] ；(5)查找表法 ^[45] ；(6)多极化数据反演方法 ^[46]
	植被覆盖地表	理论模型：①密歇根微波植被散射模型及其改进模型：MIMICS ^[35] ，Bi-MIMICS ^[36] ，MIMICS II ^[37] ；②Roo 模型 ^[38] ；③一阶草类离散相干散射模型 ^[39] ；(2)半经验模型：水-云模型 ^[40]	
被动微波	裸露或者植被稀疏地表	参数化模型：① Q/H 模型 ^[47] ；② Hp 模型 ^[48] ；③ Q/P 模型 ^[49]	(1)基于数理统计手段的反演算法 ^[51] ；(2)数据同化方法 ^[52] ；(3)正向模型算法 ^[53] ；(4)神经网络算法 ^[54]
	植被覆盖地表	辐射传输模型： $\omega\tau$ 模型 ^[50]	
主被动微波联合	裸露地表、植被稀疏和植被覆盖地表	(1)前向模型 ^[55] ；(2)几何光学模型；(3)水云模型；(4) $\omega\tau$ 模型；(5)离散植被散射模型	(1)基于主被动微波数据融合的方法 ^[56] ；(2)基于被动微波数据获取地表土壤水分反演结果，利用主动微波进行处理，实现低分辨率反演结果向高分辨率的转化 ^[19] ；(3)基于数学方法结合主被动数据反演土壤水分 ^[57]

另一方面，随着卫星遥感技术的发展，应用于土壤水分监测研究的热红外遥感数据源在时空分辨率的选择方面均得到了极大丰富(表 4)，因而成为国内外专家学者开展土壤干旱监测研究的主要手段之一。土壤热惯量是土壤的一个热特性参数，可通过热红外遥感监测地表温度的方法获取。常见的地表温度反演算法主要包括^[60]：基于 1 个热红外波段而开

发的单通道算法(如大气校正法、覃志豪单窗算法、Jiménez-Muñoz J C 单通道算法)，基于 2 个邻近红外通道开发的的劈窗算法(基于 Landsat 8-TIRS 的劈窗算法，基于 TERRA-MODIS 的劈窗算法等)和基于多个热红外波段开发的多通道算法(昼夜法、温度发射率分离法、灰体发射率法)。土壤热惯量不仅可以有效反映土壤阻止温度变化的能力，还与土壤

含水量变化显著相关,这使得热惯量法成为土壤旱情遥感监测的有效方法。由于计算真实的热惯量需要大量的地面数据,因而 Princes 等^[61]利用遥感热红外数据,基于能量平衡方程,通过简化潜热蒸发(散)形式,提出运用表观热惯量法(apparent thermal inertia, ATI)来代替真实热惯量估算土壤水分,开展区域土壤干旱监测研究。ATI 在裸土或低植被覆

盖条件下具有较高精度,且方法简单实用。缺点在于该方法不适用于植被覆盖度较高的区域,特别是由于作物稠密而掩盖了土壤信息的农田区域。此外,ATI 需要计算昼夜温度差,而卫星在昼夜过境时易受到云层覆盖的影响,从而导致实际监测效果不佳。

表 4 土壤水分监测研究的主要热红外遥感数据源

Table 4 The main thermal infrared remote sensing data of soil moisture monitoring research

平台/传感器	波段	光谱范围	空间分辨率/m	时间分辨率/d	卫星发射时间
Landsat/TM	6	10.4~12.5	120	16	1984
Landsat/ETM+	6	10.4~12.5	60	16	1999
Landsat/TIRS	10	10.6~11.19	100	16	2013
	11	11.5~12.51			
Terra/ASTER	10	8.215~8.475	90	16	1999
	11	8.475~8.825			
	12	8.935~9.275			
	13	10.25~10.95			
	14	10.95~11.65			
CEBR02/IRMSS	9	10.4~12.5	156	26	2007
HJ-1B/IRS	4	10.2~12.5	300	4	2008
FY3/MERSI	5	11.25	250	5.5	2008
Aqura/MODIS	31	10.78~11.28	1 000	0.5	2002
Terra/MODIS	32	11.77~12.27	1 000	0.5	2000
NOAA/AVHRR	4	10.5~11.3	1 100	0.5	1979
MetOp/AVHRR	5	11.5~12.5	1 100	0.5	2006

1.2.3 基于高光谱遥感的土壤含水量监测

高光谱遥感因其具有纳米级的光谱分辨率,可以有效获取土壤的反射光谱信息,为土壤水分定量反演和干旱监测提供了一种新的技术手段。高光谱数据主要来自于星载高光谱传感器获取的高光谱影像和高光谱仪在野外和实验室获取的实测数据。由于土壤含水量的多少与土壤光谱反射率值的高低成反比,因而可以根据所获取的土壤表层连续光谱,在可见光(380~780 nm)和近红外波段(780~2 526 nm)范围内建立土壤反射率和土壤含水量的关系,从而进行土壤水分的定量反演。国内外学者分别基于物理模型^[62]和统计模型^[63]描述了土壤反射率和含水量之间的关系。研究表明,高光谱技术的应用是今后开展土壤水分监测定量化研究的趋势。其不足之处:一是在土壤单位含水量一定的情况下,不同土壤类型由于受土壤母质、有机质等多种因素影响,其光谱反射率具有较大差异^[64],如何建立一种适用于不同土壤类型且普适性较高的反射率和含水量关系模型是主要难点。二是如何处理野外复杂条件下采集的实测光谱数据与实验室内获取的光谱数据之间存在较大差异。

1.3 作物需水监测指标

作物的生理状态、长势与旱情发展有着密切的关系,因此常用作物形态与植被绿度监测指标和作物生理指标来反映作物干旱需水情况^[10]。前者可以通过能够有效反映农作物形态变化以及叶绿素含量高低的植被指数来衡量农作物受干旱胁迫的状况。后者又可细化为冠层温度、植被水分变化、

作物产量、细胞液浓度、气孔导度等监测指标。在这些指标中,用冠层温度和植被水分变化的遥感反演结果衡量作物的干旱程度是当前最为有效的监测手段之一^[8]。综合杨绍锴等^[10]、孙灏等^[65]和黄友晰等^[8]的研究成果,作物形态及植被绿度变化的遥感旱情监测指数的优点在于可以通过遥感技术来监测作物长势,从而分析区域农作物的旱情,然而作物的长势往往不会因为干旱的发生而迅速发生变化,因而该方法在农业旱情监测的结果上存在一定的时间滞后性。基于冠层温度变化的遥感旱情监测指数的优点在于有较强的物理学、生态学等理论基础支撑。缺点在于这类指数的建立需要大量的参数,而这些参数多依赖于经验确定,准确度有待进一步检验。植被水分变化指数则由于水分胁迫与农作物冠层水分有直接的关系,因而可用该类指数表征农业旱情的指标。然而同作物形态指标类似,作物冠层的水分变化同样存在一个过程。因此,该类指数用于旱情监测依然存在着一定的时间滞后性。上述 3 类指数的计算方法和适用范围如表 5 所示。

2 结论与展望

通过总结当前遥感数据在农业旱情监测研究中的实际应用情况可以发现,降水监测指标、土壤含水量监测指标和作物需水监测指标在监测的实时性、准确性和应用区域的普适性等方面均存在一定的优势和不足。近年来随着研究的深

表 5 典型农业旱情遥感监测指数
Table 5 Typical agricultural drought remote sensed monitor index

监测指标	干旱监测指数算法	适用范围 ^[66]
作物形态及植被绿色度	$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{red}}{R_{NIR} + R_{red}}$	农业旱灾预警和评估
	$EVI = 2.5 \times \frac{R_{NIR} - R_{red}}{R_{NIR} + 6 \times R_{red} - 7.5 \times R_{blue} + L}$	
	$VCI = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$	
	$AVI = NDVI - \overline{NDVI}$	
	$SVI = \frac{NDVI - \overline{NDVI}}{\sigma_{NDVI}}$	
	$SAVI = \frac{(1+L) \times (R_{NIR} - R_{red})}{R_{NIR} + R_{red} + L}$	
	$CWSI = 1 - \frac{ET}{PET}$	
	$TCI = \frac{LST_{max} - LST}{LST_{max} - LST_{min}}$	
	$VSWI = B \times \frac{NDVI}{LST}$	
	作物冠层温度	
$\begin{cases} VTDI = \frac{LST - LST_{min}}{LST_{max} - LST_{min}} \\ LST_{max} = a + b \times NDVI \\ LST_{min} = a' + b' \times NDVI \end{cases}$		
$VHI = A \times VCI + (1-A) TCI$		
$GVMI = \frac{(R_{NIR} + 0.1) - (R_{SWIR} + 0.02)}{(R_{NIR} + 0.1) + (R_{SWIR} + 0.02)}$		
$\begin{cases} SPSI = \frac{1}{\sqrt{M^2 + 1}} (R_{SWIR} + MR_{NIR}) \\ R_{NIR} = MR_{SWIR} + I \end{cases}$		
作物冠层含水量	$NDWI = \frac{R_{green} - R_{NIR}}{R_{NIR} + R_{green}}$	农业旱灾预警和评估
	$SASI = \beta_{SWIR1} \times (R_{SWIR2} - R_{NIR})$	
	$SIWSI = -1 \times \frac{R_{SWIR} - R_{NIR}}{R_{SWIR} + R_{NIR}}$	

注： R_{SWIR} ， R_{NIR} ， R_{red} ， R_{blue} ， R_{green} 分别表示短波红外波段、近红外波段、红光波段、蓝光波段和绿光波段的反射率； \overline{NDVI} ， $NDVI_{max}$ ， $NDVI_{min}$ 分别代表 NDVI 的平均值、最大值和最小值； L 为土壤调节因素； σ_{NDVI} 表示 NDVI 的标准差； ET 和 PET 为蒸散量和潜在蒸散量，均可以利用 MOD16 遥感产品获取； LST_{max} 和 LST_{min} 分别代表区域地表温度的最大值和最小值； B 为图像增强系数； a ， b ， a' ， b' 为干边和湿边线性拟合方程的系数； A 为评价 VCI 和 TCI 在植被健康指数贡献比的系数； I 为短波红外和近红外光谱特征空间的截距， M 为斜率； β_{SWIR1} 表示 SWIR1-SWIR2 和 NIR-SWIR1 之间的夹角；SWIR1 和 SWIR2 为 MODIS 遥感影像的两个短波红外波段

Note: R_{NIR} ， R_{red} ， R_{blue} ， R_{green} are the spectral reflectance in the short-wave infrared, near-infrared, red, blue and green bands, respectively; \overline{NDVI} ， $NDVI_{max}$ ， $NDVI_{min}$ are the average, the maximum and the minimum NDVI, respectively; L is soil adjustment factor; σ_{NDVI} is standard deviation of NDVI; ET and PET are evapotranspiration and potential evapotranspiration, respectively, acquired using the MOD16 product; LST_{max} and LST_{min} are the maximum and the minimum land surface temperatures in a study region; B is the image enhancement coefficient; a ， b and a' ， b' are the coefficients of the dry edge and wet edge a linear fit equations, respectively; A is a coefficient the evaluate the contribution ratio of TCI and VCI in the VHI; I refers to the interception on the vertical axis; M is the slope; β_{SWIR1} is the angle between SWIR1-SWIR2 and NIR-SWIR1, where SWIR1 and SWIR2 are two short-wave infrared bands

入，越来越多的学者发现单纯应用遥感数据无法准确反映农业干旱特征。而气候学研究领域常用的再分析数据受空间分辨率的限制，在不同区域尺度上的土壤湿度数据有着一定的偏差。当前，综合遥感数据、气象数据以及地面土壤、水文、

植被等多源数据的陆面模式已成为解决农业旱情监测研究问题的新方法和新途径。目前常用的陆面模式如 CLM (community land model)，SiB (simple biosphere model)，Noah，Noah-MP，CABLE (community atmosphere biosphere land

exchange model)等,在 CLDAS, NLDAS, GLDAS 等陆面数据同化系统的整合下,开展农业旱情监测研究已成为目前研究的主要方向之一。此外,以 WOFOST 模型为代表的作物模型,通过对农作物生长发育过程与土壤、气象等环境因子进行数值模拟,可以有效反映作物在不同生育期的水分亏缺

状况,因而近年来亦成为农作物旱情监测与评估的另一热点方向。因此,如何建立普适性更好的作物生长模型,并利用数据同化技术,结合陆面模式不断降低遥感数据的不确定性,提高遥感数据的利用水平,是未来开展农业旱情定量化监测研究的关键。

References

- [1] LIU Xian-feng, ZHU Xiu-fang, PAN Yao-zhong, et al(刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,等). *Acta Geographica Sinica(地理学报)*, 2015, 70(11): 1835.
- [2] Cook B I, Smerdon J E, Seager R, et al. *Climate Dynamics*, 2014, 43(9/10): 2607.
- [3] Sheffield J, Wood E F, Roderick M L. *Nature*, 2012, 491(7424): 435.
- [4] Venteris E R, Tagestad J D, Downs J L, et al. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 39: 160.
- [5] Jin J, Wang Q, Li L H. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(6): 819.
- [6] Cheval S, Busuioc A, Dumitrescu A, et al. *Climate Research*, 2014, 60(3): 235.
- [7] Mu Q, Zhao M, Kimball J S, et al. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(1): 83.
- [8] HUANG You-xi, LIU Xiu-guo, SHEN Yong-lin, et al(黄友晰,刘修国,沈永林,等). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2015, 31(16): 186.
- [9] Lessel J, Sweeney A, Ceccato P. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(4): 913.
- [10] YANG Shao-e, YAN Na-na, WU Bing-fang(杨绍镠,闫娜娜,吴炳方). *Remote Sensing Information(遥感信息)*, 2010, 21(1): 103.
- [11] Bajracharya S R, Shrestha M S, Shrestha A B. *Journal of Flood Risk Management*, 2017, 10(1): 5.
- [12] Brunetti M T, Melillo M, Peruccacci S, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 210: 65.
- [13] Rhee J, Carbone G J. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50(3): 548.
- [14] WANG Zhao-li, ZHONG Rui-da, CHEN Jia-chao, et al(王兆礼,钟睿达,陈家超,等). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2017, 33(19): 163.
- [15] Liu Z, Lu G, He H, et al. *Water*, 2017, 9(4): 244.
- [16] WANG Yong-qian, SHI Jian-cheng, WANG Hao, et al(王永前,施建成,王皓,等). *Science China Earth Sciences(中国科学:地球科学)*, 2016, 46: 43.
- [17] Barrett B W, Dwyer E, Whelan P. *Remote Sensing*, 2009, 1(3): 210.
- [18] LI Zhen, GUO Hua-dong, SHI Jian-cheng(李震,郭华东,施建成). *Journal of Remote Sensing(遥感学报)*, 2002, 6(6): 481.
- [19] Narayan U, Lakshmi V, Jackson T J. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(6): 1545.
- [20] Engman E T, Chauhan N. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 1(1): 189.
- [21] Fung A K, Li Z, Chen K S. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 1992, 30(2): 356.
- [22] Du Y. *Waves in Random and Complex Media*, 2008, 18(1): 109.
- [23] Milder D M. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1991, 89(2): 529.
- [24] Voronovich A G. *Zhurnal Eksperimental'noii Teoreticheskoi Fiziki*, 1985, 89: 116.
- [25] Bahar E. *IEEE Transactions Antennas and Propagation*, 1981, 29(3): 443.
- [26] Shen J, Maradudin A A. *American Physical Society*, 1980, 22(9): 4234.
- [27] Bruckler L, Witono H, Stengel P. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 26(2): 101.
- [28] Dubois P C, Van Zyl J, Engman E T. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(4): 915.
- [29] Oh Y, Sarabandi K, Ulaby F T. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(2): 370.
- [30] Oh Y, Sarabandi K, Ulaby F T. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(6): 1348.
- [31] Shi J C, Wang J, Hsu A Y. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(5): 1254.
- [32] Chen K S, Yen S k, Huang W P. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 54(2): 121.
- [33] Huang S W, Tsang L. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(10): 4025.
- [34] Yee K S. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1966, 14(3): 302.
- [35] Ulaby F T, Sarabandi K M, Mc Donald K. *International Journal of RemoteSensing*, 1990, 11(7): 1223.
- [36] Liang P, Pierce L E, Moghaddam M. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(11): 2470.
- [37] Mc Donald K C, Ulaby F T. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1990.
- [38] De Roo R D, Du Y, Ulaby F T, et al. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(4): 864.
- [39] Stiles J M, Sarabandi K. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(1): 339.
- [40] Saradjian M R, Hosseini M. *Advances in Space Research*, 2011, 48(2): 278.
- [41] Kurucu Y, Sanli F B, Esetlili M T, et al. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(7): 1805.

- [42] Bourgeau-Chavez L, Leblon B, Charbonneau F, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 132(10): 71.
- [43] Paloscia S, Pettinato S, Santi E, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 34(4): 234.
- [44] Joseph A T, Van der Velde R, O'Neill P E, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(11): 2417.
- [45] Rabus B, When H, Nolan M. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(5): 2421.
- [46] Shen X Y, Hong Y, Qin Q M, et al. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(12): 4987.
- [47] Wang J R, O'Neill P E, Jackson T J, et al. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1983, 21(1): 44.
- [48] Wigneron J P, Laguerre L, Kerr Y H. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(8): 1697.
- [49] Shi J C, Jiang L M, Zhang L X, et al. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(12): 2831.
- [50] Wigneron J P, Chanzy A, Calvet J C, et al. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(3): 331.
- [51] Paloscia S, Giovanni M. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(8): 1655.
- [52] Kaheil Y H, Gill M K, Mckee M. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(5): 1375.
- [53] Liou Y A, Tzeng Y C, Chen K S. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(6): 2718.
- [54] Wigneron J P, Calvet J C, Pellarin T, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85(4): 489.
- [55] Lee K H, Anagnostou E N. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(1): 112.
- [56] YU Fan, ZHAO Ying-shi(余凡, 赵英时). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2011, 27(6): 187.
- [57] Njoku E N, Wukson W J, Dinardo S J, et al. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(12): 2659.
- [58] Abduwasit G, Qin Q M, Zhan Z M. *Environmental Geology*, 2007, 52(6): 1045.
- [59] Abduwasit G, Qin Q M, Tashpolat. T. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 62(2): 150.
- [60] ZHU Zhen-rong, CHENG Peng-gen, GUI Xin, et al(朱贞榕, 程朋根, 桂新, 等). *Geomatics and Spatial Information Technology(测绘与空间地理信息)*, 2016, 39(5): 70.
- [61] Price J C. *Remote Sensing of Environment*, 1985, 18(1): 59.
- [62] Lobell D B, Asner G P. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(3): 722.
- [63] Liu H J, Zhang Y Z, Zhang X L, et al. *Pedosphere*, 2009, 19(4): 532.
- [64] LIU Ying, YAO Yan-min(刘影, 姚艳敏). *Chinese Agricultural Science Bulletin(中国农学通报)*, 2013, 32(7): 127.
- [65] SUN Hao, CHEN Yun-hao, SUN Hong-quan(孙灏, 陈云浩, 孙洪泉). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2012, 28(14): 147.

Advance in Agricultural Drought Monitoring Using Remote Sensing Data

YAO Yuan^{1, 2, 3}, CHEN Xi^{1, 4}, QIAN Jing^{1, 2*}

1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China
2. Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
4. Research Center for Ecology and Environment of Central Asia, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

Abstract At present, frequent agricultural droughts not only seriously affect regional food security and ecological security, but also threaten social economic stability and sustainable development in the context of global warming. Using remote sensing technology to monitor agricultural drought is an important way to prevent the occurrence and development of agricultural drought, which can provide a strong support for people to develop scientific management measures. Hence, understanding the current progress in studies related to the agricultural drought monitoring based on remote sensing data has importance and practical significance in the quantitative evaluation of agricultural drought and promotion of sustainable social and economic development. In this paper, we first introduced the concepts of the drought and agricultural drought and main research methods. Secondly, we reviewed the progress of research on the agricultural drought monitoring by remote sensing, especially in monitoring indices and its methods. The monitoring indices based on remote sensing were classified into three categories: reflecting rainfall change, reflecting soil moisture change and reflecting crop water balance. Beside this, microwave remote sensing monitoring method, multi-spectral, near infrared and thermal infrared remote sensing monitoring method and hyperspectral remote sensing monitoring method which are sensitive to moisture change were selected to summarize the advance in monitor agricultural drought research by analyzing the two typical land use types of soil and vegetation. The limitations and applicability of different methods for each category were systematically summarized and described. Thirdly, the existing bottlenecks and difficulties in current research

were discussed. Finally, in order to provide a reference for quantitative monitoring and analysis of the agricultural drought, the future research directions were equally proposed.

Keywords Agricultural drought; Drought monitoring; Remote sensing data; Research progress

* Corresponding author

(Received Feb. 11, 2018; accepted Jun. 22, 2018)

欢迎投稿

欢迎订阅

欢迎刊登广告

《光谱学与光谱分析》2019年征订启事

国内邮发代码：82-68

国外发行代码：M905

《光谱学与光谱分析》1981年创刊，国内统一刊号：CN 11-2200/O4，国际标准刊号：ISSN 1000-0593，CODEN码：GYGFED，国内外公开发行人，大16开本，332页，月刊；是中国科协主管，中国光学学会主办，钢铁研究总院、中国科学院物理研究所、北京大学、清华大学共同承办的学术性刊物。北京大学出版社出版，每期售价95元，全年1140元。刊登主要内容：激光光谱测量、红外、拉曼、紫外、可见光谱、发射光谱、吸收光谱、X射线荧光光谱、激光显微光谱、光谱化学分析、国内外光谱化学分析领域内的最新研究成果、开创性研究论文、学科发展前沿和最新进展、综合评述、研究简报、问题讨论、书刊评述。

《光谱学与光谱分析》适用于冶金、地质、机械、环境保护、国防、天文、医药、农林、化学化工、商检等各个领域的科学研究单位、高等院校、制造厂家、从事光谱学与光谱分析的研究人员、高校有关专业的师生、管理干部。

《光谱学与光谱分析》为我国首批自然科学核心期刊，中国科协优秀科技期刊，中国科协择优支持基础性、高科技学术期刊，中国科技论文统计源刊，“中国科学引文数据库”，“中国物理文摘”，“中国学术期刊文摘”，同时被国内外的CSCD，SCI，AA，CA，Ei，AJ，MEDLINE，Scopus等文献机构收录。根据国家科技部信息研究所发布信息，中国科技期刊物理类影响因子及引文量《光谱学与光谱分析》都居前几位。欢迎国内外厂商在《光谱学与光谱分析》发布广告（广告经营许可：京海工商广登字20170260号）。

《光谱学与光谱分析》的主编为高松院士。

欢迎新老客户到全国各地邮局订阅，若有漏订者可直接与《光谱学与光谱分析》期刊社联系。

联系地址：北京市海淀区学院南路76号（南院），

《光谱学与光谱分析》期刊社

邮政编码：100081

联系电话：010-62181070，62182998

电子信箱：chnghxygpfx@vip.sina.com

修改稿专用邮箱：gp2008@vip.sina.com

网 址：<http://www.gpxygpfx.com>

